

УДК 621.313

МАКЕТ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ  
МАГНИТАМИ. ЧАСТЬ 1  
A MODEL OF A LABORATORY INSTALLATION FOR THE STUDY  
OF SYNCHRONOUS ELECTRIC MACHINES WITH PERMANENT  
MAGNETS. PART 1

Менжинский А. Б., к-т техн. наук, доцент; Пантелеев С. В.,  
Менжинский П. Б.,  
Военная академия Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь  
A. Menzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;  
S. Pantelev, P. Menzhinsky,  
Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

*Аннотация.* В последнее время наблюдается активный рост научных разработок в области синхронных электрических машин с постоянными магнитами, нашедших широкое применение во многих отраслях промышленности, а также в системах электроснабжения автономных объектов. Синхронная электрическая машина с постоянными магнитами является наиболее перспективной электрической машиной в диапазоне малых и средних мощностей, благодаря своим высоким энергетическим и массогабаритным показателям. Для возможности исследования таких электрических машин, а также практической реализации и апробирования новых алгоритмов управления необходимо создать лабораторную установку по изучению принципов работы и характеристик синхронных электрических машин с постоянными магнитами. В связи с этим на кафедре электротехники и систем электропитания учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь» разработан макет лабораторной установки для исследования синхронных электрических машин с постоянными магнитами.

*Annotation.* Recently, there has been an active growth of scientific developments in the field of synchronous electric machines with permanent magnets, which have found wide application in many industries, as well as in power supply systems of autonomous facilities. Synchronous electric machine with permanent magnets is the most promising electric machine in the range of small and medium capacities, due to its high energy and mass-dimensional indicators. For the possibility of studying such electric machines, as well as the practical implementation and testing of new control algorithms, it is necessary to create a laboratory facility for studying the principles of operation and characteristics of synchronous electric machines with permanent magnets. In this regard, the Department of Electrical Engineering and Power Supply Systems of the educational institution "Military Academy of the Republic of Belarus" has

developed a model of a laboratory installation for the study of synchronous electric machines with permanent magnets.

*Ключевые слова:* электромеханический преобразователь, синхронные электрические машины с постоянными магнитами, макет лабораторной установки, электрические машины.

*Key words:* electromechanical converter, synchronous electric machines with permanent magnets, laboratory setup layout, electric machines.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в качестве перспективных электромеханических преобразователей рассматриваются синхронные электрические машины с постоянными магнитами (СЭМПМ) [1]. Нашедшие широкое применение во многих отраслях промышленности, а также в системах электроснабжения автономных объектов [2–4]. Синхронная электрическая машина с постоянными магнитами является наиболее перспективной электрической машиной в диапазоне малых и средних мощностей, благодаря своим высоким энергетическим и массогабаритным показателям [5]. В связи с этим в зарубежных странах большое внимание уделяется исследованию СЭМПМ [1; 2]. Достоверность научных результатов, полученных в процессе исследования таких электрических машин, может быть проверена только при работе с реальным объектом.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для возможности исследования таких электрических машин, а также практической реализации и апробирования новых алгоритмов управления необходимо создать лабораторную установку по изучению принципов работы и характеристик СЭМПМ. В связи с этим на кафедре электротехники и систем электропитания учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь» разработан макет лабораторной установки для исследования СЭМПМ. Структурная схема макета лабораторной установки для исследования СЭМПМ представлена на рис. 1.

В состав макета лабораторной установки для исследования СЭМПМ входят:

- цифровые осциллограф марки GDS-71102 и мультиметр марки UT71E;
- персональная электронная вычислительная машина на базе процессора Intel(R) Celeron(R) CPU1000M 1,8 ГГц;
- отладочная плата Arduino Uno на основе микроконтроллера ATmega328 [6];
- выпрямительный модуль на основе диодов 10A10;
- датчик частоты вращения ротора на основе модуля датчика Холла YS-27;

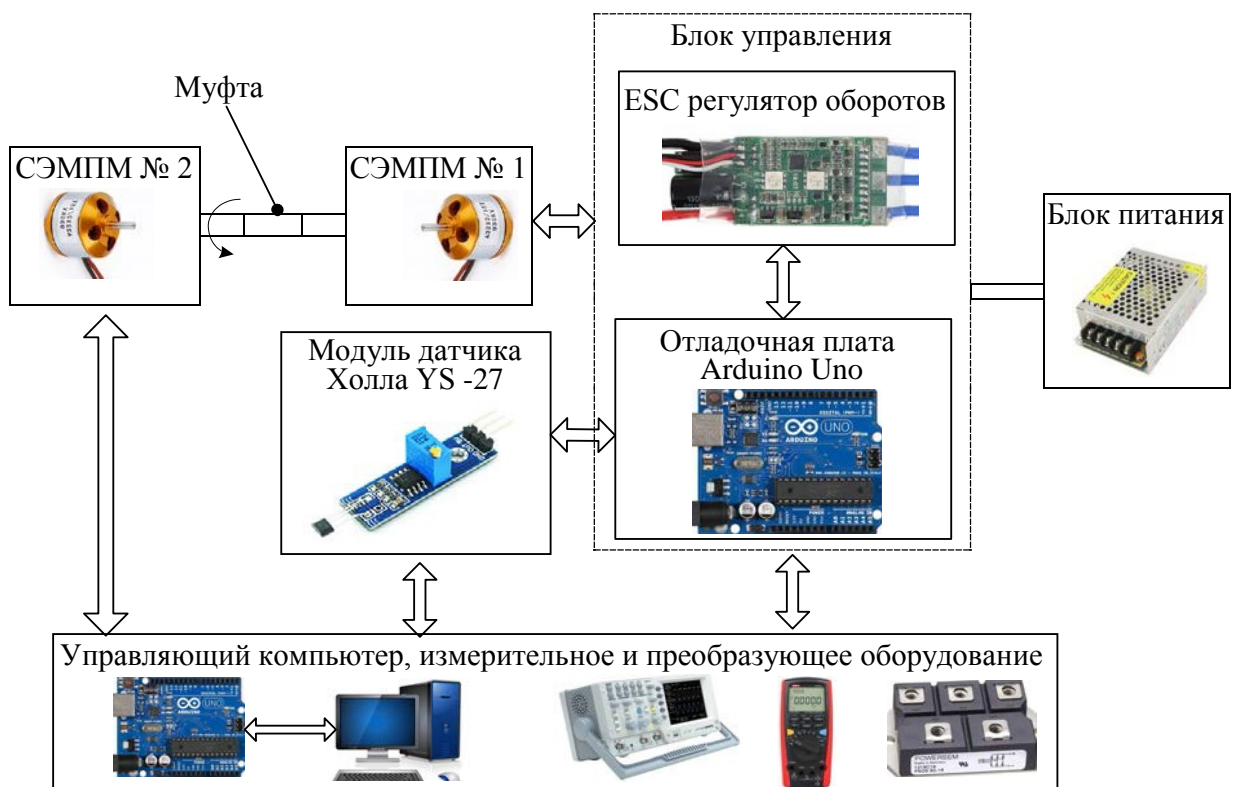


Рис. 1. Структурная схема макета лабораторной установки для исследования СЭМПМ

- ESC регулятор оборотов Brushless 30 A;
- импульсный источник питания AC-DC 12 В, 5 А;
- для разработки программного обеспечения макета лабораторной установки использовалась среда программирования Arduino IDE;
- синхронные электрические машины с постоянными магнитами.

Синхронные электрические машины с постоянными магнитами различают по форме обратной электродвижущей силы (противо-ЭДС) [1]: электрические машины с противо-ЭДС трапецеидальной формы; электрические машины с противо-ЭДС синусоидальной формы. В макете лабораторной установки использовалась СЭМПМ с противо-ЭДС трапецеидальной формы – бесколлекторная электрическая машина постоянного тока (БЭМПТ) А2212/10Т 1400KV [1]. На рис. 1 СЭМПМ № 1 – исследуемая БЭМПТ (двигательный режим работы), а СЭМПМ № 2 – нагрузочная БЭМПТ. Исследуемая и нагрузочная БЭМПТ механически соединены между собой с помощью муфты. Скорость вращения СЭМПМ № 1 регулируется путем изменения напряжения, подаваемого на статорные обмотки с регулятора оборотов. Нагрузочная БЭМПТ создает нагрузочный момент, действующий на исследуемую БЭМПТ. Нагрузочная БЭМПТ может позволить реализовать различные законы нагрузочного момента [7]. Нагрузочную БЭМПТ в большинстве экспериментов целесообразно использовать в генераторном режиме работы.

Математическое описание динамического состояния исследуемой БЭМПТ осуществляется следующей системой дифференциальных уравнений электрического равновесия и движения [8–10]:

$$\begin{cases} i_r R_r + \frac{d\Psi_r}{dt} = u_r; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \end{cases} \quad (1)$$

где  $i_r$  – ток в рабочей обмотке;

$R_r$  – активное сопротивление рабочей обмотки;

$\Psi_r$  – потокосцепление рабочей обмотки;

$u_r$  – напряжение, приложенное к рабочей обмотке;

$J$  – момент инерции;

$\omega$  – угловая скорость ротора;

$M$  – электромагнитный момент;

$M_c$  – нагрузочный момент, действующий на исследуемую БЭМПТ.

Внешний вид макета лабораторной установки для исследования СЭМПМ представлен на рис. 2.

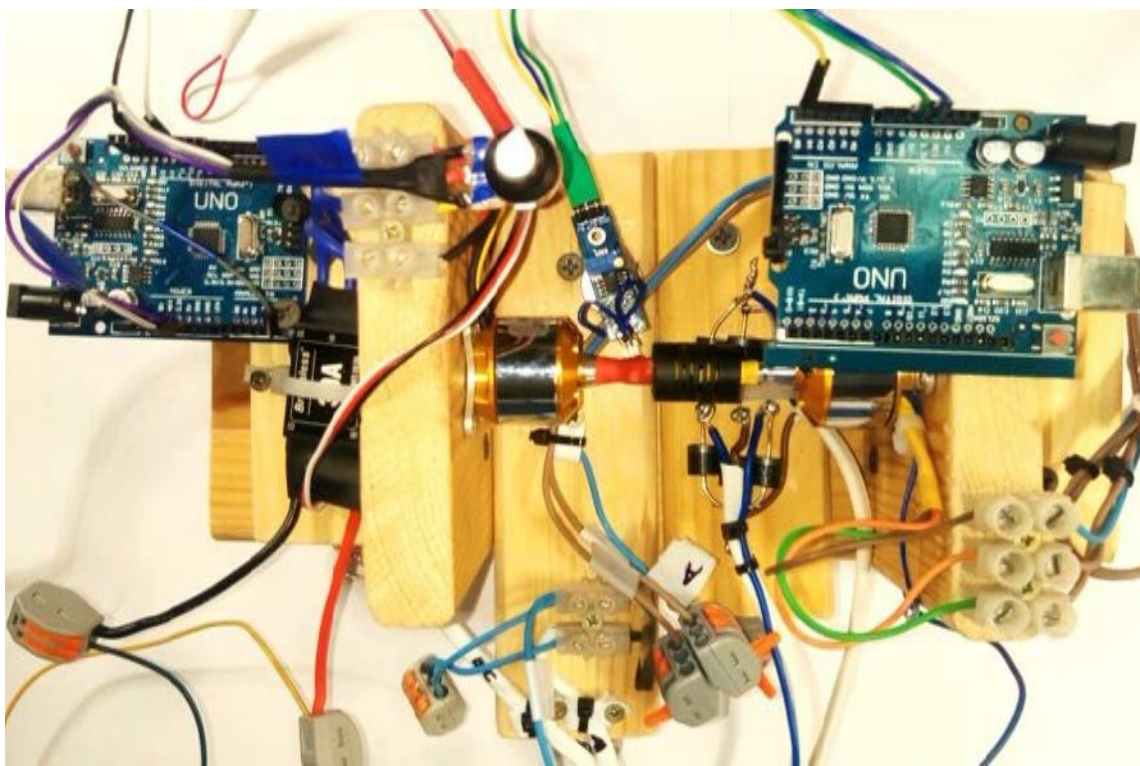


Рис. 2. Внешний вид макета лабораторной установки для исследования СЭМПМ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан макет лабораторной установки для исследования СЭМПМ. Отличительной особенностью разработанного макета лабораторной уста-

новки является возможность реализации различных законов нагрузочного момента, а также исследования СЭМПМ в различных режимах работы. Макет лабораторной установки разработан с целью возможности исследования СЭМПМ, а также практической реализации и апробирования новых алгоритмов управления ими. Это способствует развитию теории электромеханики применительно к СЭМПМ. Кроме того, предложенный макет лабораторной установки используется при подготовке магистрантов и адъюнктов кафедры электротехники и систем электропитания учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гаврилов, Р. С. Управление синхронными машинами с постоянными магнитами: учебное пособие / Р. С. Гаврилов, Ю. Н. Мустафаев; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2019. – 78 с.
2. Тягушев, С. Современные технологии управления двигателями переменного тока / С. Тягушев // Силовая электроника. – 2019. – № 5. – С. 44–47.
3. Пантелеев, С. В. Разработка аналитической модели для определения основного магнитного потока через катушку рабочей обмотки синхронной электрической машины с дробной зубцовой обмоткой / С. В. Пантелеев, А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2022. – Т. 67, № 1. – С. 75–85.
4. Менжинский, А. Б. Разработка аналитической модели для определения магнитного потока рассеяния через зубцы статора синхронной электрической машины с дробной зубцовой обмоткой / А. Б. Менжинский, С. В. Пантелеев, А. Н. Малашин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2022. – Т. 65, № 3. – С. 224–239.
5. Шевченко, А. Ф. Электромеханические преобразователи энергии с модулированным магнитным потоком / А. Ф. Шевченко. – Новосибирск: НГТУ, 1999. – 340 с.
6. Петин В. А. Проекты с использованием контроллера Arduino. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 400 с.
7. Ванин, А. В. Универсальный исследовательский стенд для испытаний электромеханических модулей манипуляционных роботов / А. В. Ванин, В. А. Польский // Вестник МГТУ им. Н Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». – 2012. – № 6. – С. 136–147.
8. Фираго, Б. И. Теория электропривода : учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Изд. 2-е. – Минск : Техноперспектива, 2007. – 585 с.
9. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины : учебник / А. В. Иванов-Смоленский. – М. : Энергия, 1980. – 928 с.
10. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин : учебник / И. П. Копылов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2001. – 327 с.